

VTT Technical Research Centre of Finland

## Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin

Markkanen, Johanna; Lauhkonen, Arttu

Published: 26/03/2021

*Document Version*  
Publisher's final version

[Link to publication](#)

*Please cite the original version:*

Markkanen, J., & Lauhkonen, A. (2021). *Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti No. VTT-CR-00245-21



VTT  
<http://www.vtt.fi>  
P.O. box 1000FI-02044 VTT  
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



# **Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin**

Kirjoittajat: Johanna Markkanen, Arttu Lauhkonen

Luottamuksellisuus: Julkinen

|   |   |
|---|---|
| <b>Raportin nimi</b><br>Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin  |   |
| <b>Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot</b><br>Ympäristöministeriö<br>PL 35<br>00023 Valtioneuvosto  | <b>Asiakkaan viite</b><br>VN/1628/2021                      |
| <b>Projektin nimi</b><br>Työkoneiden päästöjen perusennuste   | <b>Projektin numero/lyhytnimi</b><br>TYKOPERUS 129648       |
| <b>Tiivistelmä</b> <p>Työkoneiden päästöt ja niiden vähentäminen ovat nousseet kiinnostuksen kohteiksi Suomen ilmasto- ja energiapolitiikassa. Työkoneiden laajamittainen sähköistyminen on vasta alkutekijöissä, mutta kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistarve ajaa osaltaan työkoneiden sähköisten voimalinjojen kehitystä sekä siirtymistä biopolttoaineisiin. Työkoneiden päästölaskenta on toteutettu aiemmin pääasiassa tarkastelemalla fossiilisilla polttoaineilla toimivia työkoneita. Tämän työn tavoitteena oli luoda uusi perusennuste työkoneiden päästöille vuoteen 2040, joka ottaa huomioon sekä sähkökäyttöiset työkoneet että biopolttoöljyn lisääntyvän käytön. Perusennusteen taustatiedoksi toteutettiin analyysi työkoneiden sähköistymisen kehityksestä rajoittaen tarkastelu suuripäästöisimpiin työkonealuokkiin. Työssä arviointiin myös mahdollisuuksia toteuttaa eri politiikkatoimenpiteiden vaikutusarviointia työkoneiden päästölaskentamallilla, mutta mallin rajoitteet sallivat vain erillistarkastelut biopolttoöljyn jakeluvaihtoehtojen korottamisen sekä työkoneiden nopean sähköistymisen päästövähennyspotentiaaleille.</p> <p>Työkoneiden sähköistyminen on pidemmällä pienitehoisissa ja -kokoisissa työkoneissa. Suurikokoisten, latausinfraan ulottumattomissa käytettävien työkoneiden sähköistäminen on haastavaa niin akkujen energiasisällön riittävyyden kuin koneen tarvitseman tehon kannalta. Perusennusteessa sähköistymisen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin alkaa näkyä vasta 2030-luvulla. Nopean sähköistymisen skenaariossa kasvihuonekaasupäästöt vähenevät voimakkaasti vuodesta 2026 lähtien saavuttaen enintään -46 %:n lisäpäästövähennyksen vuoteen 2040 mennessä verrattuna perusennusteeseen. Biojakeluvaihtoehtojen muutoksilla saavutetaan enintään -26 %:n lisäpäästövähennys vuoteen 2040 mennessä. Sähkötyökoneiden kehitykseen vaikuttaminen esimerkiksi CO<sub>2</sub>-raja-arvoilla voi nopeuttaa markkinatarjonnan runsastumista ja täten vähentää painetta korottaa biojakeluvaihtoehtoa riittävien päästövähennysten toteuttamiseksi.</p> |   |
| Espoossa 26.3.2021  |   |
| <b>Laatija</b><br><br>Johanna Markkanen<br>tutkija  | <b>Tarkastaja</b><br><br>Juhani Laurikko<br>johtava tutkija |
| <b>VTT:n yhteystiedot</b><br>Johanna Markkanen, johanna.markkanen@vtt.fi  |   |
| <b>Luottamuksellisuus</b><br>Julkinen   |   |
| <b>Jakelu (asiakkaat ja VTT)</b><br>Tilaaja, VTT  |   |
| VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.  |   |

## Sisällysluettelo

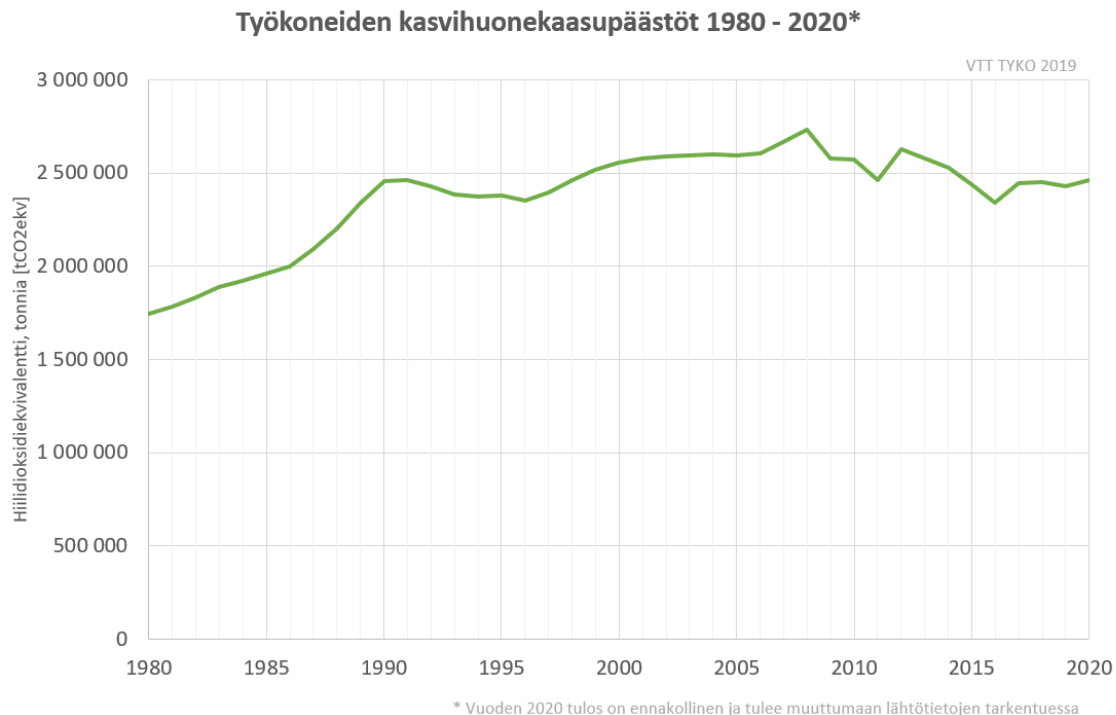
|   |    |
|---|----|
| 1. Johdanto.....  | 3  |
| 1.1 Työkoneiden päästöt.....  | 4  |
| 1.2 Keskeinen työkonepäästöihin vaikuttava sääntely .....               | 5  |
| 2. Työn toteutus .....  | 7  |
| 2.1 Menetelmäkuvaus.....  | 7  |
| 2.2 Aikataulu ja projektin eteneminen .....                             | 9  |
| 3. Työkoneiden vaihtoehtoiset käyttövoimat ja perusennuste.....         | 9  |
| 3.1 Analyysi sähkö- ja kaasukäyttöisten työkoneiden yleistymisestä..... | 9  |
| 3.1.1 Markkinatarjonta ja sen kehitys lähitulevaisuudessa .....         | 10 |
| 3.2 Työkoneiden perusennuste vuoteen 2040 .....                         | 13 |
| 3.3 Skenaariotarkastelut ja toimenpiteiden vaikutusarviot .....         | 16 |
| 3.3.1 Jakeluvelvoitteen erillistarkastelu .....                         | 17 |
| 3.3.2 Nopean sähköistymisen skenaario.....                              | 19 |
| 4. Johtopäätökset ja yhteenveto.....                                    | 20 |
| 5. Lähdeviitteet .....  | 22 |

## 1. Johdanto

Työkoneiden päästöt (kasvihuonekaasu- sekä lähipäästöt) ja niiden vähentäminen ovat nousseet kiinnostuksen kohteiksi Suomen ilmasto- ja energiapolitiikassa. VTT:n kehittämällä ja ylläpitämällä TYKO-mallilla lasketaan koko Suomen polttomoottorikäyttöisten työkoneiden ja maastoajoneuvojen vuosittaiset viralliset päästöinventaarit. TYKO-malli on kuitenkin vanhentunut nykytarpeisiin nähden eikä mallia ole uudistettu koko sen yli 20-vuotisen olemassaolon aikana.

VTT tuotti suunnitelman TYKO-mallin uudistamiseksi vuonna 2019 (Laurikko & Mäkelä 2019). Raportissa on kattavasti kuvattu TYKO-mallin vaatimat pitkän aikavälin kehitystarpeet mallin ajantasaisuuden takaamiseksi. Malli tuottaa myös aikasarjan tulevaisuuteen 2040-luvulle asti, mutta mallia ei ole koskaan varsinaisesti suunniteltu ennustamaan päästökehitystä. Työkoneiden päästölaskenta on aiemmin toteutettu pääasiassa tarkastelemalla fossiilisilla polttoaineilla toimivia työkoneita. Työkoneiden vaihtoehtoisten käyttövoimien yleistymisen asettaa haasteita työkoneiden nykyiselle päästöjen sekä energiankäytön laskennalle. Vaihtoehtoisten käyttövoimien ja etenkin sähköisten työkoneiden yleistymisen on kuitenkin alkutekijöissään, ja muutoksen suuruutta sekä nopeutta ei ole aiemmin arvioitu.

Työkoneiden tulevaisuuden päästöennusteissa on tarve ottaa huomioon vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivat työkoneet, kuten sähköisellä voimalinjalla varustetut ja kaasukäyttöiset työkoneet. Tämän projektin tavoitteena oli analysoida työkoneiden sähköistymisen ja "kaasuistumisen" vaikutusta päästöihin hyödyntäen alan kirjallisuutta, työkonevalmistajien sekä työkonevyyjien tuoreimpia tietoja sähköistymisen etenemisestä. Analyysin avulla tuotettiin uudet, päivitettyt perusennusteet työkoneiden päästökehitykselle vuoteen 2040 asti hyödyntäen TYKO-mallia.



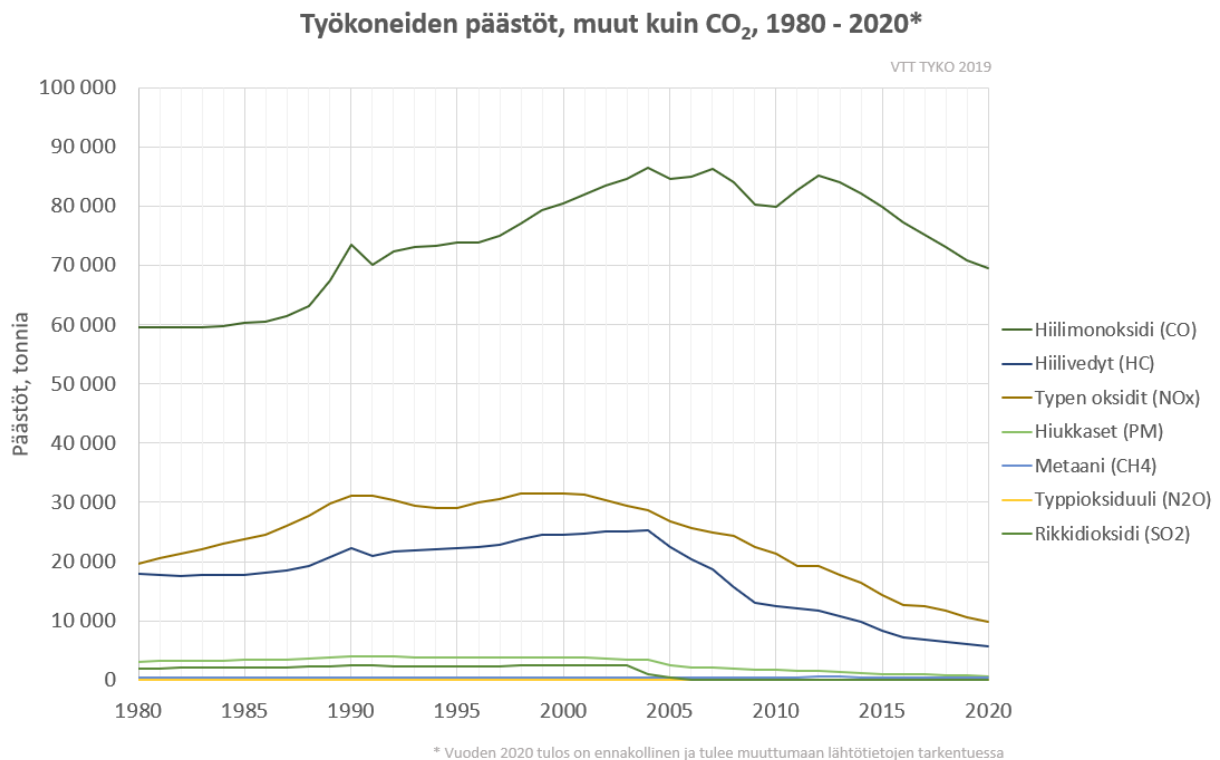
Kuva 1. Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt vuosina 1980 – 2020.

Yhä kasvava kiinnostus khk-päästövähennystoimenpiteisiin ja niiden vaikutusten arviointeihin haastaa myös nykyisen työkoneiden energiankäytön- ja päästöjen mallinnuksen: TYKO-mallia käyttäen toimenpiteiden tarkastelua ei ole aiemmin tehty. Tämän projektin toisena tavoitteena

oli selvittää mitä TYKO-mallilta vaaditaan, jotta toimenpiteiden tarkastelu Suomen työkonekantaan on mahdollista. Vaatimusten pohjalta määriteltiin mitä mallin uudistustöitä voidaan toteuttaa lyhyellä aikavälillä skenaariotarkastelujen mahdollistamiseksi.

## 1.1 Työkoneiden päästöt

Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt ovat pysyneet likimain samalla tasolla viimeisen 30 vuoden ajan TYKO 2019 -mallin tulosten mukaan (Kuva 1). Mallinuksissa päästöt ovat vaihdelleet vain hieman alle 2.5 miljoonan CO<sub>2</sub>ekv-tonnin ja yli 2.5 miljoonan CO<sub>2</sub>ekv-tonnin välillä. Muita määrällisesti merkittäviä työkoneiden polttoaineen poltosta aiheutuvia suoria päästöjä ovat hiilimonoksidi, typen oksidit ja hiilivedyt (Kuva 2). Hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöt ovat kasvaneet saavuttaen huippunsa vuonna 2004. Kaikki lähipäästöt ovat kuitenkin vähentyneet viimeisten 15 vuoden aikana työkoneiden Stage-päästösääntelyn vuoksi.



Kuva 2. Työkoneiden päästöt, muut kuin CO<sub>2</sub>, vuosina 1980 – 2020.

Valtaosa moottoroiduista työkoneista käyttää fossiilisia polttoaineita käyttövoimanaan, mutta vaihtoehtoiset käyttövoimat kuten sähkö ja kaasu alkavat olla varteenotettavia vaihtoehtoja tietyissä työkonekategorioissa. TYKO-malli sellaisenaan laskee vain fossiililla polttoaineilla toimivien työkoneiden päästöt. Dieseltöykoneiden oletetaan käyttävän fossiilista moottoripolttoöljyä eli kevyttä polttoöljyä, bensiinitöykoneiden oletetaan käyttävän liikennekäyttöön myytävää bensiiniseosta ja kaasukäyttöisten maakaasua; ainoa malliin sisällytetty kaasukäyttöinen työkonne on haarukkatrukki.

Työkoneiden khk-päästöistä 80% on peräisin vain kymmenestä eri työkoneryhmästä. Kun tähän lisätään vielä yhdeksän seuraavaksi suuripäästöistä työkoneryhmää, saadaan 90% kaikista khk-päästöistä. Täten vaihtoehtoisien käyttövoimien ja etenkin sähköistymisen

yleistymisen kannalta on mielekästä tarkastella vain Taulukossa 1 lueteltuja suuripäästöisimpiä työkoneryhmiä, sillä niillä on suurin vaikutus kokonaisuuteen.

Suuripäästöisimpien työkoneryhmien joukossa valtaosa on dieselkäyttöisiä. Maataloustraktorit, pyöräkuormaajat ja tela-alustaiset kaivukoneet tuottavat jo lähes puolet kaikista khk-päästöistä. Moni suuripäästöinen työkoneryhmä on joko maatalous-, metsä- tai maanrakennuskone, mutta joukossa on myös puutarhakoneisiin kuuluvat ajettavat- ja työnnettävät ruohonleikkurit. Maastoajoneuvoista 2-tahtiset moottorikelkat ovat myös listalla; mikäli kaikki moottorikelkat summattaisiin yhdeksi ryhmäksi, ne kuuluvat myös suuripäästöisimpien työkoneneiden joukkoon.

*Taulukko 1. Suuripäästöisimmät työkoneryhmät (VTT TYKO 2019)*

| #  | Käyttövoima | Työkoneryhmä                       | tCO <sub>2</sub> ekv | %    |
|----|-------------|------------------------------------|----------------------|------|
| 1  | diesel      | Maataloustraktorit                 | 390 326              | 16 % |
| 2  | diesel      | Pyöräkuormaajat                    | 385 994              | 32 % |
| 3  | diesel      | Kaivukoneet, tela-alustaiset       | 367 712              | 47 % |
| 4  | diesel      | Hakkuukoneet (Moto)                | 216 006              | 56 % |
| 5  | diesel      | Haarukkatrukit, diesel             | 173 047              | 63 % |
| 6  | diesel      | Dieselgeneraattorit                | 111 288              | 68 % |
| 7  | diesel      | Metsätraktorit                     | 106 599              | 72 % |
| 8  | diesel      | Kaivukoneet, pyöräalustaiset       | 83 540               | 76 % |
| 9  | diesel      | Leikkuupuimurit                    | 51 350               | 78 % |
| 10 | diesel      | Muut traktorit                     | 42 923               | 79 % |
| 11 | benssiini   | Ajoruohonleikkurit, benssiini      | 41 487               | 81 % |
| 12 | benssiini   | Moottorikelkat 2-tahti, muu käyttö | 33 140               | 82 % |
| 13 | diesel      | Muut ajettavat dieseltyökoneet     | 32 043               | 84 % |
| 14 | diesel      | Kompressorit                       | 29 617               | 85 % |
| 15 | diesel      | Teleskooppikurottajat              | 29 347               | 86 % |
| 16 | benssiini   | Ruohonleikkurit, benssiini         | 27 056               | 87 % |
| 17 | diesel      | Monitoimikoneet                    | 25 953               | 88 % |
| 18 | diesel      | Tiehöylät                          | 24 760               | 89 % |
| 19 | diesel      | Traktorikaivurit                   | 23 847               | 90 % |

Tämän projektin tarkastelut rajattiin koskemaan Taulukossa 1 esitettyjä työkoneryhmiä niiden suuren merkityksensä vuoksi.

## 1.2 Keskeinen työkonepäästöihin vaikuttava sääntely

Työkoneiden päästöihin vaikuttava lainsäädäntö painottuu kotimaan ja EU:n tasolla moottorien pakokaasujen terveydelle haitallisten lähipäästöjen sekä polttoaineiden laadun ja koostumuksen sääntelyyn. Suurin osa työkoneluokista on hiilidioksidipäästösäätelyn ulkopuolella (Nylund, Söderena & Rahkola 2016). Lähipäästöjen määriin on pyritty vaikuttamaan työkonemoottorien Stage -luokituksella. Stage -sääntely alkoi vuonna 1997 voimaan tulleella direktiivillä (97/68/EY) ja sen jälkeen Stage-luokkia on asteittain kiristetty ja sääntelyn pariin on lisätty koneluokkia. Viimeisimmät vaatimukset ovat tulleet EU-asetuksen No: 2016/1628 myötä (Motiva 2020).



Stage -säänneltyihin päästöihin kuuluvat hiilimonoksidi eli häkä, typenoksidit, pienhiukkaset ja hiilivedyt sekä myös ammoniakkipäästöt sääntelyn vaiheissa III ja IV. Hiilidioksidipäästöjä ei ole Stage -lainsäädännössä rajoitettu, mutta Stage IV -luokasta alkaen moottorivalmistaja on velvollinen ilmoittamaan päästö määrän (Nylund, Söderena & Rahkola 2016; Motiva 2020).

Uusiutuvan energian käytön edistämiseen pyrkivä uusiutuvan energian direktiivi RED II (EU 2018/2001) tuli voimaan 24.12.2018. Direktiivin mukaan uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta tulee olla vähintään 32 % vuoteen 2030 mennessä. RED II on saatettava osaksi kansallista lainsäädäntöä viimeistään 30.6.2021 ja se korvaa alkuperäisen uusiutuvan energian direktiivin RED I (2009/28/EY). RED II:n toimeenpano on tällä hetkellä meneillään ja direktiivin vaatimusten johdosta mm. jakeluvelvoitelaki ja kestävyyslaki tullaan uudistamaan (TEM 2021; Koponen & Sokka 2019).

## BIOSEKOITEVELVOITE

Bio-osuuden määrää polttoaineissa sääntelee biovelvoitelainsäädäntö. Lainsäädännön perustana on polttoaineiden laatudirektiivi (Fuel Quality Directive, FQD) 2009/30/EY sekä uusiutuvan energian käytön direktiivi RED I ja jatkossa RED II. (Sipilä 2018; St1 2021)

Työkoneisiin myytävän biopolttoöljyn määrää säädellään lailla biopolttoöljyn käytön edistämisestä (2019/418). Lain tarkoituksena on edistää biopolttoöljyn käyttöä kevyen polttoöljyn korvaamiseksi lämmityksessä, työkoneissa ja kiinteästi asennetuissa moottoreissa. Lain polttoainejakelussa biopolttoöljyn energiasisällön osuus kulutukseen toimitettavan kevyen polttoöljyn ja biopolttoöljyn energiasisällön kokonaismäärästä (jakeluvelvoite) tulee olla vähintään 3,0 prosenttia vuonna 2021 ja seuraavina vuosina aina yhden prosenttiyksikön edellisvuotta suurempi vuoteen 2028 asti, josta alkaen osuuden tulee olla vähintään 10,0 prosenttia<sup>1</sup>. On huomionarvoista, että jakeluvelvoite ulottuu myös lämmitykseen. Vaikutukset päästöihin ovat tätä kautta huomattavasti laajemmat.

## POLTTOAINEIDEN LAATUSÄÄNTELY

Eri vuodenaikojen polttoainelaatujen ominaisuuseroilla havaittiin olevan vaikutusta polttoaineenkulutukseen vuonna 2004 julkaistussa tutkimuksessa (Murtonen), jossa testattiin erilaisten diesel-polttoaineiden eroja raskaassa linja-automootorissa. Tarkasteltaessa yksikössä litraa/tunti, tuloksiin vaikutti osittain polttoaineiden tiheyserot; tiheämmällä polttoaineella saadaan moottorista suurempi teho, jos polttoaineen lämpöarvo ei muutu. Kulutuserot aiheutuivat myös muista tekijöistä, kuten polttoaineen viskositeetistä ja lämpöarvosta. (emt.) Tulokset eivät ole suoraan sovellettavissa työkone moottoreihin tai niissä käytettäviin polttoaineisiin, koska pelkästään työympäristö ja työskentelytavat vaikuttavat suuresti polttoaineenkulutukseen. Tutkimus kuitenkin vahvistaa käsitystä siitä, että polttoaineiden keskimääräisiin ominaisuuksiin vaikuttavalla laatusäätelyllä on osavaikutus työkoneiden polttoainekulutukseen ja edelleen työkoneiden aiheuttamiin päästöihin.

Polttoaineiden laatua sääntelevät muun muassa direktiivit 98/70/EY, joka astui voimaan vuonna 2000, 2003/17/EY, joka astui voimaan vuonna 2005 sekä vuonna 2011 voimaan tullut laatudirektiivi (FQD) 2009/30/EY. Lainsäädännön lisäksi pakokaasupäästövaatimusten myötä on muodostunut öljyalaa koskevia laatuvaatimuksia eli standardeja. Standardeja on laadittu öljynjalostuksen ja laitevalmistajien yhteistyönä. Standardit<sup>2</sup> ovat suosituksia, joiden käyttöä viranomaiset voivat vaatia. On huomioitava, että kansalliset lait ovat standardien yläpuolella ja

<sup>1</sup> Laki biopolttoöljyn käytön edistämisestä (2019/418).

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2019/20190418>

<sup>2</sup> Diesel: EN 590:2013; Benssiini: EN 228:2012; Etanoli: EN 15376:2014; Korkeaseosetanoli E85: CEN/TS 15293:2011; Polttoöljy: Kansallinen SFS 5968:2009; Biokomponentit FAME: EN 14214:2014; HVOCEN/TS: 15940:2012 (tulossa EN 15940).



markkinalähtöiset ja paikallisten olosuhteiden tuomat vaatimukset polttoaineille ylittävät yleensä standardien vähimmäistason. (St1 2021)

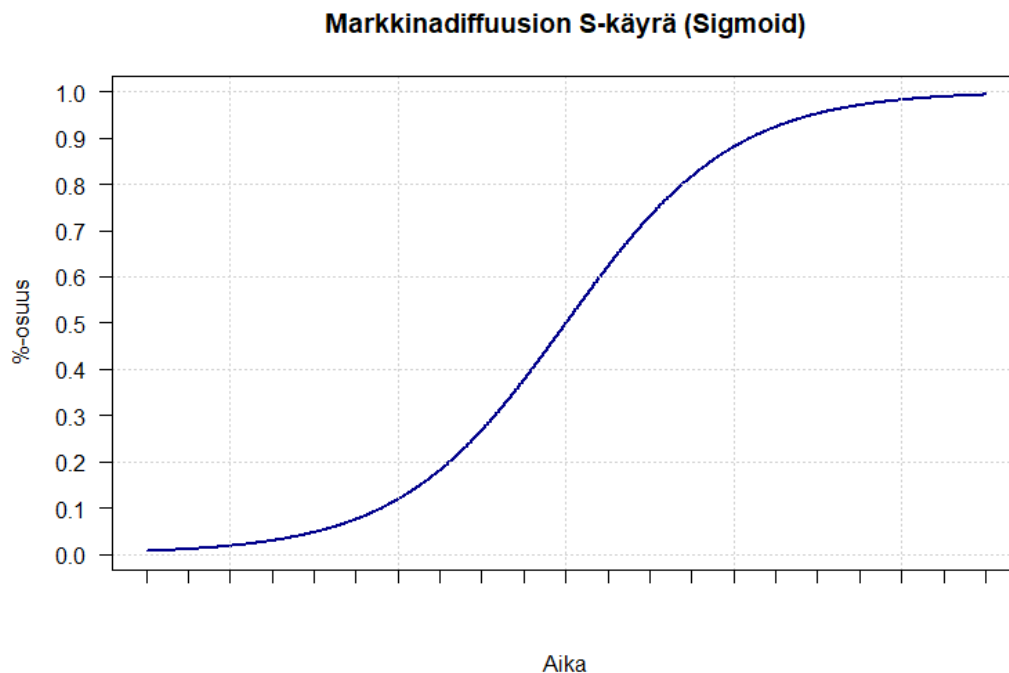
## 2. Työn toteutus

### 2.1 Menetelmäkuvaus

Vaihtoehtoisten käyttövoimien yleistymistä analysointiin vain merkittävimpien, suuripäästöisten työkoneryhmien osalta (Taulukko 1). Vaihtoehtoista käyttövoimista merkittävimpinä pidettiin tällä hetkellä sähköä ja kaasua.

Tämänhetkistä markkinatilannetta tutkittiin Teknisen Kaupan Liiton myyntitilastoilla, joista puutarhakoneille oli saatavissa käyttövoimakohtainen jaottelu. Lisäksi hyödynnettiin maanrakennuskoneiden myyntitilastoa, jossa samanlaista käyttövoimakohtaista jaottelua ei ollut sähkökoneiden vähäisten myyntimäärien vuoksi. Teknisen Kaupan Liitto teetti alkuvuonna 2021 kyselyn työkonemyyjille myytyjen maanrakennuskoneiden käyttövoimista: kyselyn tuloksia hyödynnettiin sähköisten maanrakennuskoneiden sekä maastoajoneuvojen markkinadiffuusion arvioinnissa. Markkinadiffuusiota ja työkonekehityksen tilaa arvioitiin myös hyödyntäen työkonevalmistajien tietoja, uutisartikkeleita sekä alan tieteellistä kirjallisuutta. Osa jo TYKO-malliin sisällytetyistä lähtötiedoista myyntien osalta sisältää tiedon käyttövoimasta; tietoa hyödynnettiin myös analyysissä.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella kaasukäyttöisten työkoneiden markkinadiffuusio muissa työkoneissa kuin trukeissa ei ole edennyt osin edes tuotekehitysvaiheeseen. Tästä syystä työssä tehtiin rajausta jättää kaasukäyttöisten työkoneiden tarkastelu pois, sillä teknologinen kehitys ei niiden osalta ole vielä kypsä.



Kuva 3. Markkinadiffuusio

Uusien käyttövoimien onnistunutta markkinadiffuusiota kuvaa S-käyrä (Kuva 3), jossa muutos on alussa eksponentiaalisesti kiihtyvää, saavuttaa huippunsa puolivälissä, ja on tämän jälkeen

eksponentiaalisesti hidastuvaa. Tämä kuvastaa uusien innovaatioiden käyttöönoton epävarmuuksia ja riskejä (Orr 2003). Sähkökäyttöisten työkoneneiden myyntimäärien muutoksen oletettiin seuraavan S-käyrää. Työssä oletettiin myös, että sähkökäyttöiset työkoneneet tulevat korvaamaan polttomoottorikäyttöiset työkoneneet pitkällä aikavälillä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Aiemmin TYKO-mallin myyntimäärät ovat olleet vakioita seuraten nykytason kehitystä; myyntimäärien muuttuessa myös tulevaisuuden ennustettua myyntimäärää on korjattu.

TYKO-malli ei sisällä sähkökäyttöisten työkoneneiden kantaa, joten sähkökäyttöisten työkoneneiden vaikutusta päästöihin oli mahdollista toteuttaa aikataulun puitteissa vain vähentämällä oletettua polttomoottorikäyttöisten työkoneneiden myyntimäärää.

$$Uusi\ myynti\left(\frac{kpl}{v}\right) = Vanha\ myynti\left(\frac{kpl}{v}\right) \times (1 - p)$$

Työkoneneiden myyntimäärien muuttamiseksi kullekin tarkasteltavalle työkoneryhmälle määriteltiin markkinadiffuusion tämänhetkinen tila, eli kuinka suuri osa työkoneryhmän kokonaismyynteistä on sähkökäyttöisiä ( $p$ ). Sen lisäksi määriteltiin muutoksen nopeus eli kuinka paljon sähkökäyttöisten myynti on kasvanut edellisvuodesta niille työkoneneille, joille tarkkaa tilastotietoa oli saatavilla. Näitä työkoneneita olivat ajoruuhoonleikkurit, ruuhoonleikkurit ja trimmerit. Trimmerit eivät kuulu suuripäästöisimpien työkoneneiden listalle, mutta uuden myyntidatan perusteella trimmerien myyntiennuste oli merkittävän epätarkka ja virhe korjattiin uuden datan myötä.

Muille työkoneryhmille ei ollut numeerista tietoa muutosnopeudesta. Sähkökäyttöisten työkoneneiden markkinadiffuusioista ja muutosnopeudesta on kirjallisuudessa hyvin vähän arvioita: Lajunen (2018) arvioi, että vuonna 2035 puolet uusista työkoneneista on varustettu sähköisellä voimalinjalla, tarkoittaen molempia ladattavia hybridejä sekä täysin sähköisiä työkoneneita. TYKO-mallissa ei kuitenkaan voida huomioida hybridikoneneita lainkaan; mikäli arvioissa olettaisimme puolet uusista työkoneneista täysin sähköisiksi, olisi sähköistymisen vaikutus mitä todennäköisimmin yliarvioitu. Jotta otimme huomioon TYKO-mallin puutteet hybridikoneneiden mallintamiseen, siirsimme aiemmin mainittua arviota siten, että vuonna 2040 puolet uusista työkoneneista on täyssähköisiä. Tätä arviota käyttäen analysoitiin muutosnopeus ja uudet myyntimäärät maanrakennuskoneneista kaivukoneneille, pyöräkuormaajille, traktorikaivurille ja teleskooppikurottajille sekä maastoajoneuvoista mönkijöille ja ammattikäyttöön myytävälle moottorikelkoille. Haarukka- ja muille trukeille sähköistymisen muutosnopeus arvioitiin rekisteritiedon ja työkonemyyjien tiedon perusteella. Maa- ja metsätalousskoneneiden oletetaan sähköistyvän hitaimmin (Lajunen et al. 2018), joten sähkökoneneiden ei oleteta saavan markkinaosuutta myynissä ennen 2035. Maa- ja metsätalousskoneneista leikkuupuimureiden, maataloustraktoreiden, hakkuukoneneiden, metsätraktoreiden ja muiden traktoreiden sähköistyminen asetettiin alkamaan vuodesta 2035 siten, että puolet näiden työkoneneiden myynneistä on täyssähköisiä vuonna 2050.

Työkonene päästöjen uutta, päivitettyä perusennustetta varten TYKO 2019-malliin päivitettiin biopolttoöljyn jakeluvelvoite<sup>3</sup> täysimääräisenä dieselikäyttöisille työkoneneille.

Projektin vaihe 3 piti sisällään arvion TYKO-mallin soveltuvuudesta eri toimenpiteiden ja päästövähennyskeinojen vaikutusarvioihin. Seuraavien päästövähennyskeinojen tarkastelun mahdollisuutta arviointiin:

- biopolttoöljyn jakeluvelvoitteen muutos
- biokaasun käyttö työkoneneissa

<sup>3</sup> Laki biopolttoöljyn käytön edistämisestä (418/2019)

- polttoaineiden veronkorotusten ja investointitukien tarkastelut
- muutokset työkoneneiden energiatehokkuudessa
- muutokset työkoneneiden työsuoritteissa
- sähkö- ja vetykäyttöisten työkoneneiden yleistyminen

Kunkin osalta arviointiin, onko tarkastelu sellaisenaan mahdollista nykyisessä TYKO-mallissa, mitä mahdollisia muutoksia TYKO-malli vaatii ja kuinka suuri muutosten toteuttamiseen vaadittu työmäärä on. Arviot koostettiin taulukkoon raportin osaan 3.3.

## 2.2 Aikataulu ja projektin eteneminen

Projekti aloitettiin helmikuun alusta. Työkoneneiden sähköistymisen analyysi sekä perusennuste (vaiheet 1 ja 2) tehtiin samanaikaisesti helmikuussa siten, että perusennuste valmistui 26.2.2021. Perusennusteen kooste esitettiin yhteiskokouksessa tilaajalle 2.3.2021, jolloin keskusteltiin myös WAM-skenaarioiden ja toimenpidearviointien tarpeista sekä toiveista. Keskustelu toimi pohjana projektin vaiheelle 3, jossa määritettiin muutostarpeen työkoneneiden energiankulutuksen- ja päästöjen mallinnukseen toimenpidearviointien toteuttamiseksi. Viimeisenä laskettiin erillistarkasteluna biojaketulvoitteen korottamisen sekä nopean sähköistymisen päästövähennyspotentiaalit.

## 3. Työkoneneiden vaihtoehtoiset käyttövoimat ja perusennuste

---

### 3.1 Analyysi sähkö- ja kaasukäyttöisten työkoneneiden yleistymisestä

Työkoneneiden vaihtoehtoiset käyttövoimat ovat suurelta osin vasta joko saapumassa markkinoille tai kehitysvaiheessa. Sähkö- ja kaasukäyttöiset työkoneneet asettavat uusia haasteita työkoneteknologian kehitykselle; riittävän energiamäärän varastointi vaatii kookkaita akkuja tai kaasutankkeja, jotka vievät enemmän tilaa kuin polttomootoritekniikka työkoneneissa.

Kehitys on nopeinta pienten työkoneneiden osalta, joissa koneen tyypillisen käytön tarvitsema energiamäärä voidaan varastoida vaatimatta liiallisia muutoksia työkoneneen suunnitteluun. Myös työkoneneen tyypillinen toimintaympäristö vaikuttaa kehitykseen. Toisessa ääripäässä on työkoneneet, joita operoidaan sisätiloissa tai rajatulla ulkoalueilla. Nämä työkoneneet on helpompi sähköistää, sillä tiheä latausmahdollisuus sallii pienemmän akun käytön. Toisessa ääripäässä on taasen metsätyökoneneet, jotka voivat operoida maastossa päiviä erillisen dieselsäiliön voimin palaamatta infran ääreen ennen työn loppuunsaattamista. (Lajunen et al. 2018)

Työkoneneiden kirjo on valtavaa ja yhä useammin työkonene on suunniteltu spesifisesti tiettyyn työtehtävään (Lajunen et al. 2018). Tehontarve on sähköistymisen kannalta haastavaa: kunkin työkoneneen sähköinen voimalinja tulee suunnitella juuri kyseisen työtehtävän tyypillisiin käyttöjaksoihin sopivaksi, jotta moottori kykenee tarjoamaan riittävästi tehoa (Moreda, Muñoz-García & Barreiro 2016). Täten spesifisen sähköisen voimalinjan rakentamiseen vaadittua tekniikkaa ei voida yleistää kaikkiin työkoneneisiin sopivaksi vaan tekniikka joudutaan suunnittelemaan uniikiksi jokaista työkonenetyyppiä varten (Lajunen et al. 2018).

Tällä on taasen vaikutus hintakehitykseen: uuden teknologian kehityksessä massatuotanto saa aikaan hintojen laskun, mutta spesifiin työtehtäviin tarkoitettujen työkoneneiden myyntimäärät eivät maailmanlaajuisestikaan ole suuria. On mahdollista, että hintakehitys jää maltilliseksi monien spesifisten sähkökäyttöisten työkoneneiden osalta. (Lajunen et al. 2018).

### 3.1.1 Markkinatarjonta ja sen kehitys lähitulevaisuudessa

Tarkasteltavien työkoneryhmien vaihtoehtoisten käyttövoimien markkinatarjonnan analyysi jaettiin kahteen osaan: runsaan ja kapean markkinatarjonnan työkoneisiin. Kaasukäyttöisten työkonien markkinatarjontaa sekä kehitystä on tarkasteltu samanaikaisesti, vaikkakin tarkastelun pääpaino on sähkökäyttöisissä työkoneissa.

#### Runsas markkinatarjonta

Tarkastelluista työkoneryhmistä muutama täyssähkökäyttöinen ja yksi kaasukäyttöinen on onnistuneesti tuotu markkinoille ja tarjoaa runsaan valikoiman eri kokoluokissa (Kuva 4).

Haarukkatrukkeja, ajoruohonleikkureita, kompressoreita ja työnnettäviä ruohonleikkureita on saatavana markkinoilla runsaasti täyssähköisinä versioina. Haarukkatrukeissa myös kaasu on realistinen vaihtoehto, sillä esimerkiksi Toyota Forklifts:lla on suurempi valikoima kaasukäyttöisiä trukkeja kuin dieselkäyttöisiä<sup>4</sup>. Työkonemyyjien mukaan Suomessa tällä hetkellä myytävistä haarukkatrukeista kuitenkin keskimäärin 79% on sähkökäyttöisiä ja loput dieselkäyttöisiä. Otoks oli kuitenkin pieni, eikä välttämättä täten edusta täysin koko Suomen haarukkatrukkimyyntiä. Rekisteritietojen perusteella (TYKO-mallin lähtötieto, luottamuksellinen) valtaosa rekisteröidyistä, haarukkatrukeista on dieselkäyttöisiä; näin ollen on myös selvää, että suurinta osaa trukeista ei rekisteröidä lainkaan. Data antaa viitteitä sille, että tieliikenteessä ajettavilla haarukkatrukeilla pääasiallinen käyttövoima on yhä diesel, eikä sähkökäyttöiset ole korvanneet vielä toistaiseksi niitä; ajotarpeen määrä ja latausmahdollisuudet tulevat vaikuttamaan siihen, kuinka nopeasti dieselkäyttöiset haarukkatrukit korvautuvat sähkökäyttöisillä.



Kuva 4. Runsas markkinatarjonta eri kokoluokissa sähkö- ja/tai kaasukäyttöisille työkoneille talvella 2020 tehdyn katsauksen mukaan.

Ruohonleikkureissa sähkö on jo kilpailukykyinen vaihtoehto polttomoottorikäyttöisten ajo- ja työnnettävien ruohonleikkurien rinnalla. Sähkökäyttöisten työnnettävien ruohonleikkureiden osuus myynnistä oli 28 % vuonna 2019 ja nousi 36 %:iin vuonna 2020. Ruohonleikkureiden myyntivolyymit ovat suuria ja uusi käyttövoimakohtainen data antoi aihetta korjata TYKO-mallin edellistä oletamaa polttomoottorikäyttöisten ruohonleikkureiden myynnistä, joka oli oletettu liian suureksi. Ajoruohonleikkureissa valtaosa on yhä polttomoottorikäyttöisiä. Ruohonleikkureiden markkinoille saapuneet akkukäyttöiset robottiruohonleikkurit yleistyvät vauhdilla ja kilpailevat muiden ruohonleikkureiden rinnalla markkinaosuudesta; niiden myyntimäärät olivat jo liki samaa luokkaa ajoruohonleikkureiden kanssa vuonna 2020. Myös

<sup>4</sup> Toyota Forklifts: Polttomoottorikäyttöiset vastapainotrukit. <https://toyota-forklifts.fi/tuotteemme/polttomoottorikaeyttoiset-vastapainotrukit/?page=1&sortStrategy=0>

muut puutarhatyökoneet sähköistyvät nopeasti; uusista pensasleikkureista 96 % on sähkökäyttöisiä, silppureista 99 %, kannettavista puhaltimista 70 %, vesipumpuista 96 % ja sahoista 34 % vuonna 2020; em. muut puutarhatyökoneet kuin ruohonleikkurit eivät sisällyneet suuripäästöisimpien työkonereiden joukkoon eikä niitä täten otettu huomioon laskennassa. Merkittävää on se, että sähkökäyttöisten suhteellinen osuus myynnistä on kasvanut vuodesta 2019 vuoteen 2020 jokaisessa edellä mainituissa tilastoiduissa työkoneryhmässä.

Kompressoreissa sähkö on yleisesti saatavilla oleva käyttövoima, mutta niiden myyntivolyymi TYKO-mallissa on pientä, eikä myynnin jakautumisesta polttomoottori- ja sähkökäyttöisiin ole tarkempaa tietoa saatavilla.

### Kapea markkinatarjonta tai ei markkinatarjontaa lainkaan

Suurella osalla paljon päästävistä työkoneryhmistä on kapea tai rajoitettu markkinatarjonta tai ei markkinatarjontaa lainkaan, kun tarkastellaan vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivia työkoneita (Kuva 5).

Harvesterien ja leikkuupuimurien myyntimäärät ovat joitakin satoja vuodessa, mutta mallitarjonta vaihtoehtoisissa käyttövoimissa on rajoittunutta. Harvesterien (hakkuukoneiden) osalta markkinoilla on yksi hybridimalli valmistajalta Logset<sup>5</sup>. Täyssähköisten ja kaasukäyttöisten harvestereiden kehityksestä ei ole tietoa tarjolla. Leikkuupuimureista löytyy yksi kaasukäyttöinen malli<sup>6</sup>, mutta sähkökäyttöisten kehityksestä ei ole tietoa.

Traktoreista maataloustraktorit, metsätraktorit ja muut traktorit tarkasteltiin yhtenä traktoriluokkana tiedon vähyyden takia. John Deere kehittää sähköistä traktorimallistoaan ja on esitellyt prototyypin täyssähköisestä traktorista<sup>7</sup>, mutta tuotantoa ja myyntiä ei vielä ole. Fendt on myös kehittänyt yhden täyssähköisen mallin<sup>8</sup>, joka ei ole toistaiseksi tuotannossa. TYKO-mallin lähtödatan tarkastelu osoitti kuitenkin, että traktorirekisterissä on muutamia sähkökäyttöisiä maataloustraktoreita, joiden huomioiminen tarkastelussa vaatisi enemmän tietoa niiden alkuperästä. New Holland on esitellyt prototyypinsä kaasutraktorista<sup>9</sup>, jonka arvioidaan päätyvän myyntiin noin 2021 tiheän kaasuverkon maihin Italiaan ja Saksaan. Myös Valtralla on ollut jo pidempään kehitteillä metaani-diesel-hybriditraktorit<sup>10</sup>. Kuitenkin valtaosa vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivista traktoreista on vasta konsepti- ja tuotekehitysvaiheessa.

<sup>5</sup> Logset 12H GTE Hybrid. <https://www.logset.com/fi/harvesterit/logset-12h-gte-hybrid>

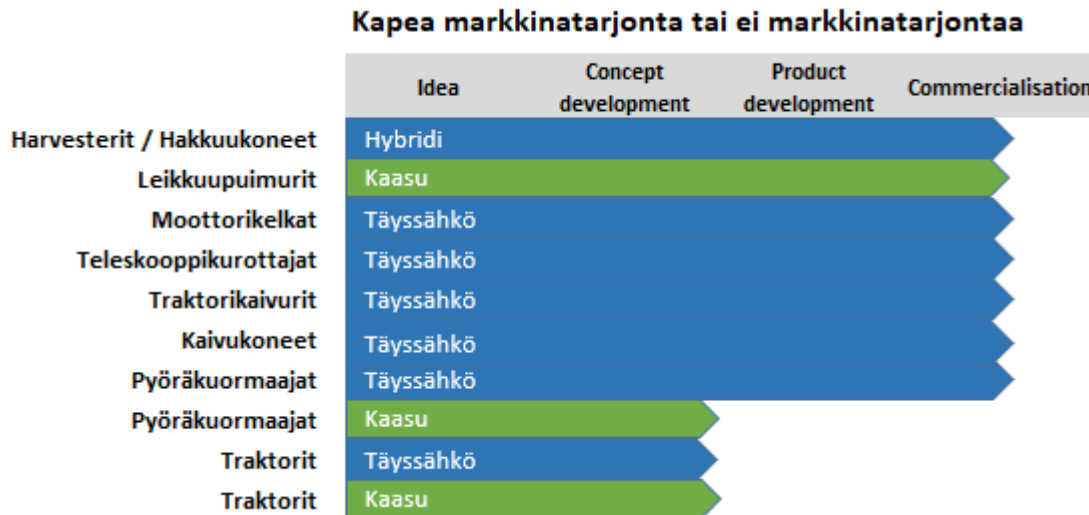
<sup>6</sup> Bioenergy International: Gomselmash trial world's first CNG-powered combine harvester. <https://bioenergyinternational.com/technology-suppliers/gomselmash-trial-worlds-first-cng-powered-combine-harvester>

<sup>7</sup> Maaseudun tulevaisuus: John Deere esitteli täysokokaisen sähkötraktorin. <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/koneet-autot/john-deere-esitteli-t%C3%A4ysikokoisen-s%C3%A4hk%C3%B6traktorin-katso-video-1.172310>

<sup>8</sup> Fendt e100 Varjo: The battery-powered compact tractor. <https://www.fendt.com/int/fendt-e100-vario>

<sup>9</sup> Maaseudun tulevaisuus: Biokaasu käyttöön: New Hollandin ensimmäiset metaanitraktorit markkinoille kahden tai kolmen vuoden kuluessa <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/maatalous/artikkeli-1.224815>

<sup>10</sup> Kivirock: Valtra esitteli kuusisylinterisen SCR-moottorilla varustetun biokaasutraktorin. <https://www.kivirock.fi/uutiset.html?270>



Kuva 5. Kapea markkinatarjonta tai ei markkinatarjontaa lainkaan sähkö- ja/tai kaasukäyttöisille työkoneille talvella 2020 tehdyn katsauksen mukaan.

Suuret maa- ja metsätalousteknikat ovat yhä käytännössä polttomoottorillisia, mutta niiden osalta automaatio voi edistää sähköistämistä; automatisaatio on mahdollista toistuvissa ja ennakoitavissa työtehtävissä (Lajunen et al. 2018). Sähköistymistarkastelussa otettiin huomioon se, että suuritehoiset koneet ovat erittäin todennäköisesti viimeisimpiä työkoneita, joiden sähköversiot saapuvat markkinoille, mutta olettaen, että automatisaatio ajaa kehitystä. Täyssähköisten myynnin arvioitiin alkavan perusskenaariossa täten vasta 2035. Hybridejä myydään mahdollisesti jo aiemminkin, mutta hybridikoneita ei voida huomioida nykyisessä TYKO-mallissa.

Rakennuskäyttöön tarkoitetuista teleskooppikurottajista löytyy täyssähköisiä kurottajia pienessä kokoluokassa. Kaasukäyttöisten kehityksestä ei ole tietoa. Kurottajien vuosittaiset myyntivolyymit ovat pieniä ja mallitarjonta kapeaa. TYKO-malli huomioi vain rakennuskäyttöön tarkoitetut teleskooppikurottajat, ei esimerkiksi satama-alueilla käytettäviä suuritehoisia konttikurottajia. Mikäli satama-alueiden suuritehoiset konttikurottajat otettaisiin mukaan laskentaa, se nostaisi kokonaisuutena. Konttikurottajia on jo saatavana täyssähköisinä ja hybridiversioina; esimerkiksi Kalmar valmistaa vähemmän polttoainetta kuluttavia ”ekokurottajia”<sup>11</sup>. Satamakurottajien sähköistymiskehityksen myötä voidaan olettaa, että myös rakennuskäyttöön tarkoitettavat suuritehoisemmat kurottajat kyetään teknologisesti sähköistämään lähitulevaisuudessa.

Traktorikaivureissa sähköistyminen on vasta alkanut, kun esimerkiksi valmistaja Case on julkistanut ensimmäisen täyssähköisen traktorikaivurimallinsa<sup>12</sup> vuonna 2020. Traktorikaivurien vuosittainen myynti on todella pientä Suomessa, eikä tuoreen työkonemyyjille suunnatun kyselyn perusteella täyssähköisiä traktorikaivureita vielä myydä.

Pyöräkuormaajista täyssähköisiä versioita on saatavilla ainakin pienessä ja keskikokoluokissa. Mallivalikoima on kuitenkin suppeaa ja valmistajilla on merkittävästi suurempi määrä vastaavia polttomoottoripyöräkuormaajia myytävänä. Valmistajista esimerkiksi Avant ei itsekään suosittele täyssähköisiä mallejaan ensisijaiseksi työkoneeksi missään työkategoriassa<sup>13</sup>. Kaasukäyttöiset pyöräkuormaajat ovat konseptikehitysvaiheessa; Case

<sup>11</sup> Kalmar: Kurottajat. <https://www.kalmar.fi/laitteet-palvelut/konttikurottajat/>

<sup>12</sup> Case Construction: The industry's first fully electric backhoe loader - The Case 580 EV. <https://www.casece.com/northamerica/en-us/products/backhoe-loaders/580ev-project-zeus>

<sup>13</sup> Avant kuormaajat. <https://www.avanttecno.com/fi/kuormaajat>



esitteli metaanikäyttöisen pyöräkuormaajan<sup>14</sup> konseptin Baumassa vuonna 2019. Valtaosa myytävistä pyöräkuormaajista TYKO-mallissa on suuremman kokoluokan koneita, kuin mitä markkinoilla tällä hetkellä olevat täyssähköiset versiot voisivat korvata. Työkonemyyjien mukaan sähkökäyttöisiä pyöräkuormaajia myyntiosuus Suomessa on hieman alle yksi prosentti. Pienten pyöräkuormaajien sähköistymisellä on pieni vaikutus laskennan lopputulokseen, mutta odotettavissa on myös suuremman kokoluokan pyöräkuormaajien sähköistyminen, jolla tulee olemaan suurempi vaikutus.

Kaivinkoneissa täyssähköisten markkinatarjonnan tarkastelu ei tuonut esille julkisesti myynnissä olevia sähkökaivinkoneita; Cat on esitellyt prototyypin suuren kokoluokan sähköisestä tela-alustaisesta kaivinkoneesta<sup>15</sup>. Suomen työkonemyyjien tilastojen mukaan kuitenkin täyssähkökäyttöisiä kaivinkoneita myydään keskimäärin 0,5 % ja hybridejä noin 5 % kokonaismyynnistä. Kaasukäyttöisiä kaivinkoneita ei julkisen tiedon mukaan ole millään kehitysasteella. Kaivinkoneiden myyntivolyymit ovat muutamia satoja vuosittain ja tämänhetkisen tiedon valossa sähköistyminen on alkanut.

Tiehöyliä vaihtoehtoisista käyttövoimista ei ollut tietoa saatavilla. Tiehöyliä tehon- ja energiantarve on korkea ja voidaan olettaa, että akkuteknologian tulee kehittyä energiatiheämmäksi ennen kuin tiehöyliä sähköistämisen on teknologisesti ja ekonomisesti kannattavaa. Tiedon puutteen vuoksi tiehöyliä oletetaan olevan tulevaisuudessakin polttomootorilla toimivia.

Maastoajoneuvoista moottorikelkat ovat suuripäästöisimpien työkonien joukossa. Sinänsä moottorikelkka ei ole työkonie, mutta niiden päästölaskenta on integroitu työkonien päästölaskentaan. Markkinatarkastelun mukaan moottorikelkkojen sähköistyminen on vasta alkanut. Sähköisiä moottorikelkkoja valmistaa kaupallisesti Suomessa Aurora Powertrains, jonka tuotannon määrä on toistaiseksi rajallinen ja kelkkoja myydään vain ammattikäyttöön<sup>16</sup>. Moottorikelkkojen vuosittaiset myyntivolyymit ammattikäyttöön ovat tuhannen kelkan luokkaa; mikäli pieni osa näistä kelkoista myytäisiin sähköisiä, olisi vaikutus työkonien kokonaispäästöihin hyvin pieni. Työkonemyyjien mukaan kuitenkin sähköisiä moottorikelkkoja ei ole myyty heidän kauttaan, vaikka suppeaa markkinatarjontaa on. Näin ollen voidaan olettaa, että sähkömoottorikelkkojen mallitarjonta laajenee lähitulevaisuudessa, mutta sähköistyminen kohdistuu ensin voimakkaammin ammattikäyttöön myytäviin kelkkoihin. Todennäköisesti vuoteen 2040 mennessä markkinoilla on jo yksityiskäyttöön tarkoitettuja täyssähköisiä moottorikelkkoja. Mönkijät eivät kuuluneet suuripäästöisimpien työkonien joukkoon, mutta työkonemyyjien mukaan noin 1,5 % myydyistä uusista mönkijöistä on täyssähköisiä.

Näiden edellä mainittujen työkoneryhmien jälkeen jäljelle suuripäästöisten listalla jäävät muut ajettavat dieselyökonet ja monitoimikoneet, joiden sähköistymisen vaikutuksen tarkastelu on haastavaa TYKO-mallissa työkoneryhmien laajuuden vuoksi

### 3.2 Työkonien perusennuste vuoteen 2040

Uusi perusennuste työkonien päästöjen kehitykselle aikavälillä 2020 – 2040 on laskusuuntainen kaikille päästölajeille.

<sup>14</sup> Case Construction: World's first methane powered construction vehicle at Bauma 2019. <https://www.casece.com/emea/en-eu/resources/news/2019/case-unveils-the-worlds-first-methane-powered-vehicle-at-bauma>

<sup>15</sup> Caterpillar unveils an all-electric 26-ton excavator with a giant 300 kWh battery pack. <https://electrek.co/2019/01/29/caterpillar-electric-excavator-giant-battery-pack/>

<sup>16</sup> Koneviesti: Suomalainen startup-yritys Aurora Powertrains aloittaa sähköisten moottorikelkkojen toimitukset norjalaiselle Hurtigruten Svalbardille. <https://www.koneviesti.fi/uutiset/artikkeli-1.524952>



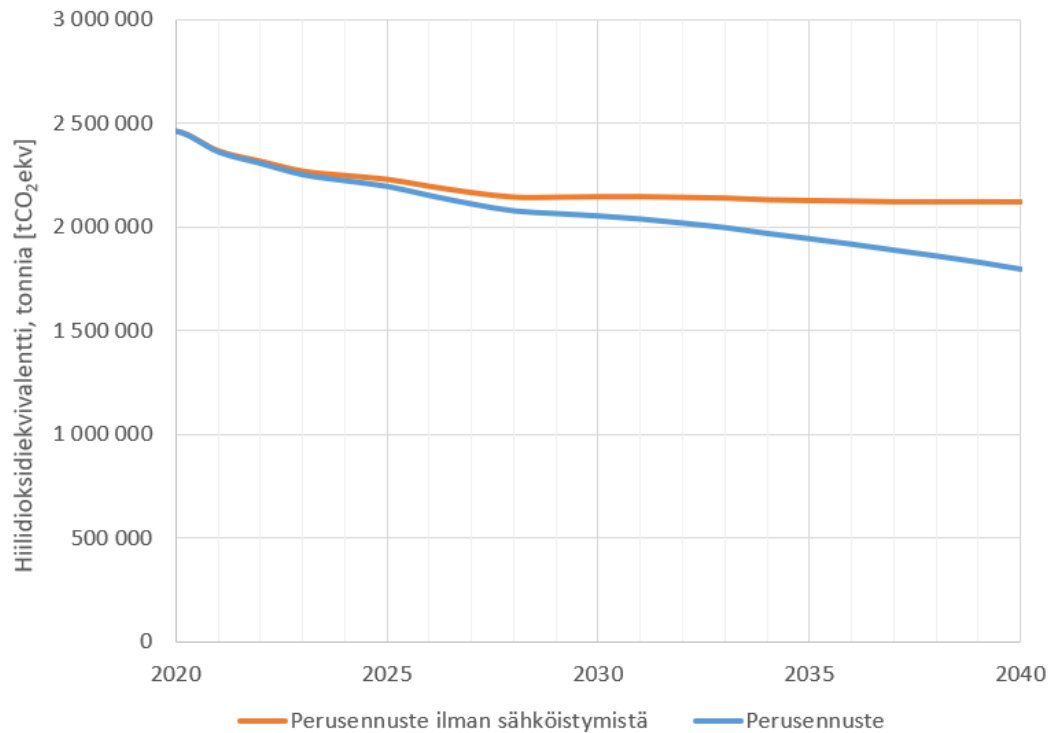
Ennen sähkökäyttöisten työkonien huomioimista TYKO-mallin laskennassa työkonien khk-päästöt vähenevät vuoteen 2028 asti biopolttoöljyn jakeluvelvoitteen vuoksi. Tämän jälkeen ennusteessa khk-päästöjen väheneminen pysähtyy, sillä jakeluvelvoitteen oletettiin pysyvän vakiotasollaan 10 %:ssa aina vuoteen 2040 asti.

Sähkötyökonien sisällyttäminen TYKO-malliin vaikutti selvästi perusennusteen päästökehitykseen. Uusi perusennuste sisältää maltillisen sähköistymisen vaikutuksen työkonepäästöihin; perusennuste kuvaa tämänhetkisen tiedon mukaisesti (kts. kappale 3.1 *Analyysi sähkö- ja kaasukäyttöisten työkonien yleistymisestä*) sähkötyökonien markkinadiffuusion minimitason vaikutusta polttomoottorikonien myyntimäärien vähenemiseen. Tästä lähtien perusennusteella viitataan nimenomaan uuteen perusennusteeseen, joka sisältää oletuksen sähkötyökonien yleistymisestä.

Perusennusteessa khk-päästöt vähenevät -26 % vuoteen 2040 mennessä verrattuna nykytilaan eli vuoden 2020 tasoon (Kuva 6). Sähkötyökonien hidas markkinadiffuusio 2020-luvulla ei vaikuta päästöihin vielä merkittävästi. Vasta 2030-luvulla teknologisen kehityksen oletetaan olevan kypsempää vauhdittamaan markkinadiffuusiota.

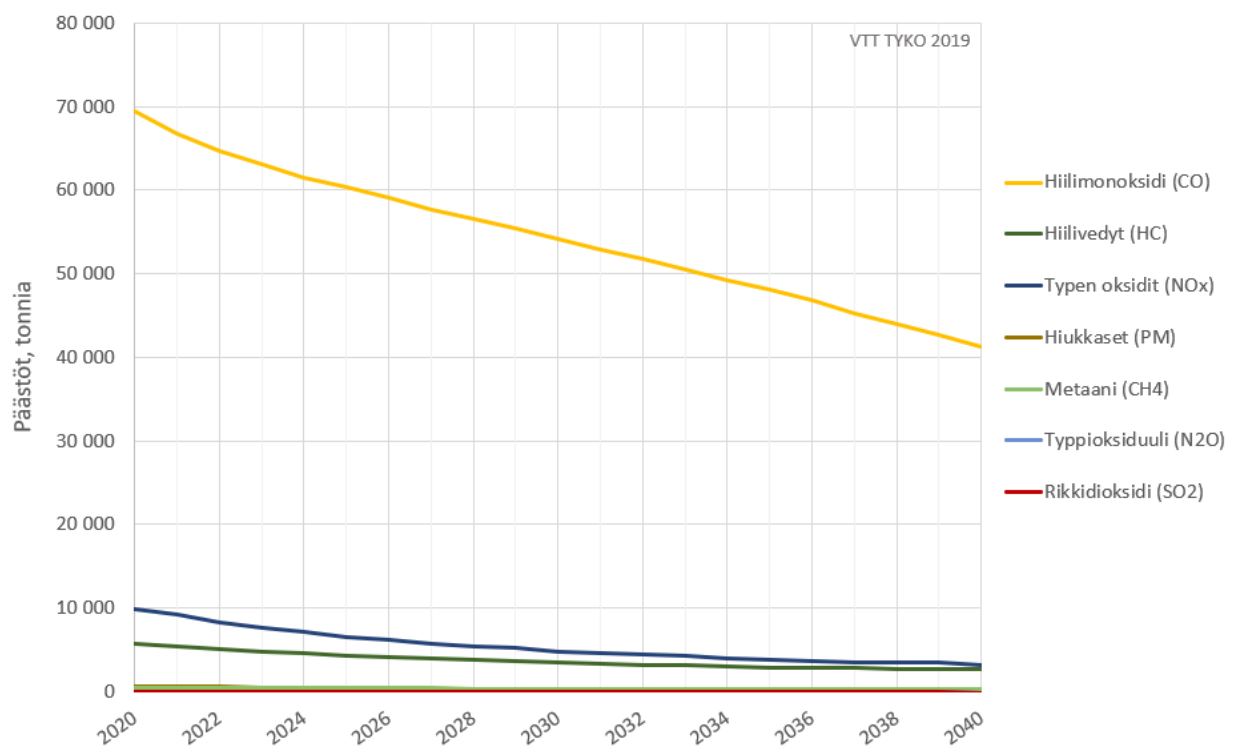
Polttomoottorityökonien väheneminen edesauttaa myös terveydelle haitallisten ilmapäästöjen vähentämisessä (Kuva 7). Kaikissa päästöissä kehitys on laskusuuntaista: hiilimonoksidi- eli häkäpäästöissä eniten ja hiukkaspäästöissä vähiten.

### Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt 2020 - 2040



Kuva 6. Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt perusennusteessa vuosina 2020 – 2040.

### Työkoneiden päästöt, muut kuin CO<sub>2</sub>, perusennuste 2020 - 2040



Kuva 7. Työkoneiden muut päästöt perusennusteessa vuosina 2020 – 2040.

### 3.3 Skenaariotarkastelut ja toimenpiteiden vaikutusarviot

TYKO-mallin soveltuvuutta toimenpiteiden vaikutusten arviointiin ja tulevaisuusskenaarioiden luomiseksi on tarkasteltu tutkimalla mahdollisten toimenpiteiden muuttamista nykyisessä mallirakenteessa (Taulukko 2). Mikäli toimenpiteen tarkastelu sellaisenaan ei ole nähty mahdollisena, taulukossa on listattu vaaditut muutokset mallin rakenteeseen ja toimintaan tarkastelun mahdollistamiseksi.

*Taulukko 2. Toimenpiteiden tarkastelu TYKO-mallissa.*

| Mahdollinen toimenpide  | Tarkastelu mahdollista | Vaaditut muutokset TYKO-malliin  | Työmäärä   |
|---|------------------------|--|------------|
| Biopolttoöljyn jakeluvelvoitteen muutos                         | kyllä*                 | *Tarkastelu on hidasta. Useampien jakeluvelvoitteen tasojen tarkasteluun TYKO-malli tulee siirtää toiseen ohjelmointiympäristöön, jossa tarkasteluja voidaan automatisoida.  | suuri      |
| Biokaasun käyttö työkonelissa                                   | ei**                   | Kaasukäyttöisten ja kaasumuunnettujen työkonelien lisääminen malliin. **Nykyisellään TYKO-malli sisältää vain kaasukäyttöiset haarukkatrukit.  | keskisuuri |
| Polttoaineiden veronkorotusten ja investointitukien tarkastelut | ei                     | TYKO-mallia tulisi laajentaa sisältämään polttoaineiden hinta- ja verotiedot, työkonelien investointikustannukset sekä kustannusten vaikutukset työkonelien kantaan ja käyttöön. Vaatii laajan taustatutkimuksen parametrien säätämiseksi. | suuri      |
| Muutokset työkonelien energiatehokkuudessa                      | ei                     | Säätömuuttujan lisääminen, jolla energiatehokkuutta voidaan muuttaa halutussa työkoneryhmässä. Vaatii muutoksia mallirakenteeseen .  | keskisuuri |
| Muutokset työkonelien työsuoritteissa                           | ei                     | Käyttöliittymä käyttötuntien muuttamiseksi eri työkoneryhmiin.   | keskisuuri |
| Sähkö- ja vetykäyttöisten työkonelien yleistäminen              | kyllä***               | ***Yleistymistä voi kuvata vain vaikutuksella polttomoottorikonelien myyntiin. Sähkö-, hybridi- ja vetykäyttöisten työkonelien tulisi lisätä malliin omina kategorioinaan, jotta niiden kannan muutoksia voi seurata.                      | keskisuuri |

Tarkastelu osoitti, että TYKO-mallilla suoritettavat toimenpiteiden päästö- ja kustannusvaikutusten tarkastelut vaatisivat laajoja muutoksia mallirakenteeseen. Toimenpiteestä riippuen TYKO-mallin rakennetta ja laskentamenetelmiä tulisi muuttaa Taulukko 2:ssä kuvatuilla tavoilla. Kaasu-, sähkö- ja vetykäyttöisten työkonelien lisääminen on yksinkertaisin toteutettavissa oleva työ, joka sekin on työmäärältään keskisuuria. Käytännössä Excel-pohjaiseen TYKO-malliin ei ole suositeltavaa tehdä yksittäisiä rakenteellisia muutoksia, sillä mallirakenne on vanha ja tulisi nykyaikaistaa siirtämällä pois Excel-ympäristöstä muuhun toimintavarmempaan ohjelmointiympäristöön. Siirto tekisi kompleksisen mallin hallinnasta on nopeampaa, vähentäisi virheherkkyyttä ja loisi mahdollisuuden vaikuttaa mallin kaikkiin muuttujiin.

TYKO-mallin heikkous toimenpiteiden vaikutusten arvioinneissa on etenkin se, että malli on hajautettu kolmeen eri osamalliin. Malleissa kunkin työkoneluokan energiankulutuksen- ja päästöjen laskenta on omalla välilehdellään. Kunkin mallin kaikki välilehdet tulee ajaa erikseen, ja kunkin työkonelien tietojen muuttaminen täytyy suorittaa manuaalisesti jokaisessa eri osamallissa, jokaisella eri välilehdellä. Laskutoimenpiteet suoritetaan ketjutettuna makroissa, joita on kymmenittäin. Näistä syistä TYKO-malli nykyisessä muodossaan ei sovellu skenaarioiden luontiin ja toimenpiteiden päästövaikutusten arviointiin ilman mallirakenteen täydellistä uudistusta. Kustannusvaikutusten arviointiin nykyisellä TYKO-mallilla ei ole

edellytyksiä, sillä malli laskee energiankäyttöä sekä päästöjä, eikä sisällä kustannusparametrejä.

### 3.3.1 Jakeluvelvoitteen erillistarkastelu

Tilaajan pyynnöstä laadittiin kolme eri skenaariota biopolttoaineen jakeluvelvoitteen korotuksen päästövähennyspotentiaalille koskien työkoneiden khk-päästöjä. TYKO-mallia ei käytetty sellaisenaan tarkastelussa (kts. perustelu Taulukko 2), mutta tarkastelun pohjana käytettiin TYKO-mallilla laskettua polttoaineen sekä urealiuoksen kulutusta.

Vertailutasona käytettiin perusennustetta, jossa sähköistymispotentiaali on otettu minimissään huomioon (nk. uusi perusennuste). Työssä tarkasteltiin kolmea eri tasoa jakeluvelvoitteelle:

#### **BIO20:** Korotus 20 %:iin vuonna 2035

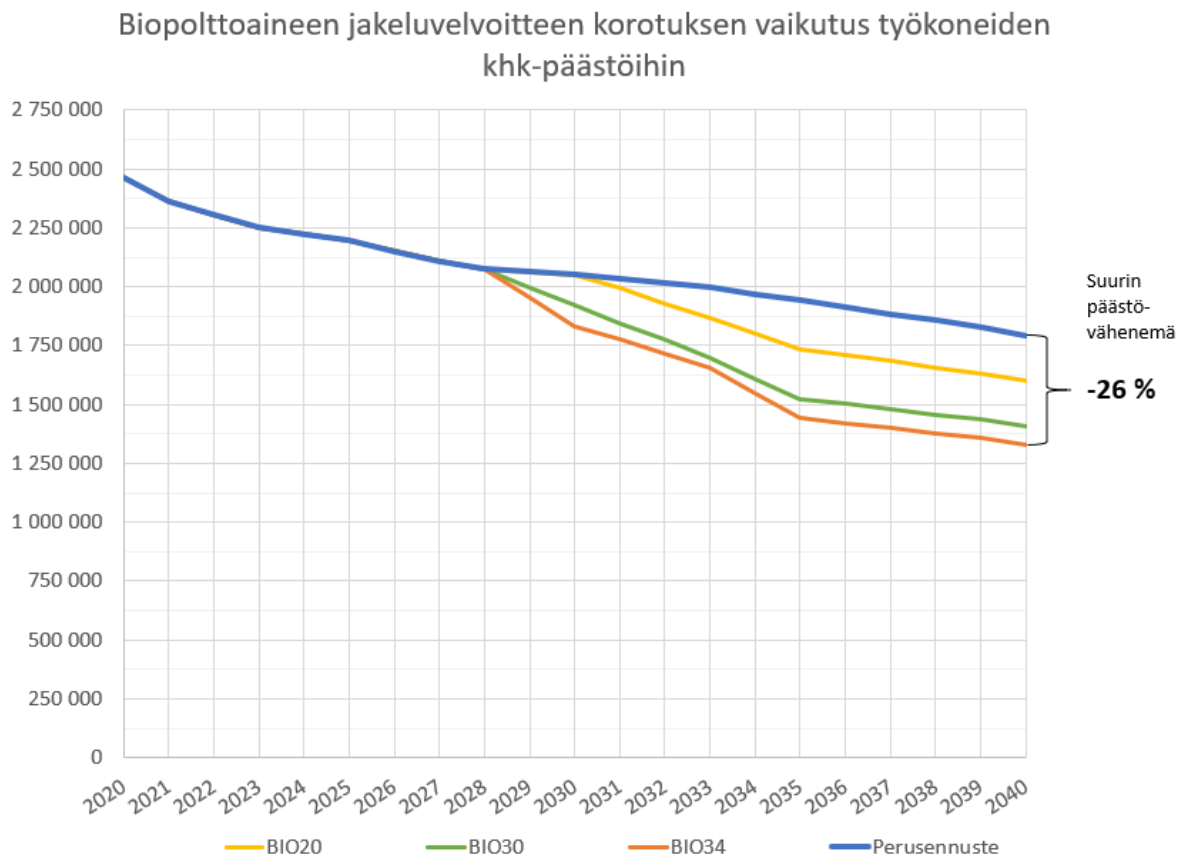
- Korotus vuodesta 2031 alkaen +2 %/v

#### **BIO30:** Korotus 30 %:iin vuonna 2035

- Korotus vuodesta 2029 alkaen +3 %/v

#### **BIO34:** Korotus 20 %:iin vuonna 2030 ja 34 %:iin vuonna 2035

- Korotukset jaettiin mahdollisimman tasaisesti välttämällä suuria kertalisäyksiä, jolloin jakeluvelvoitteen uudet tasot BIO34-skenaariossa olivat seuraavat:
  - 2029: 15 %
  - 2030: 20 %
  - 2031: 22 %
  - 2032: 24 %
  - 2033: 26 %
  - 2034: 30 %
  - 2035 ja eteenpäin: 34 %



Kuva 6. Jakeluvaihteen korotusten vaikutus khk-päästöihin kolmessa eri skenaariossa.

Biojakeluvaihteen korottaminen vähentää työkoneiden suoria fossiilisia khk-päästöjä kaikissa skenaarioissa. Päästövähennykset realisoituvat aikaisintaan vuodesta 2029 skenaarioissa BIO30 ja BIO34 ja vuodesta 2031 skenaariossa BIO20. Biojakeluvaihteen korottamisen lisäpäästövähennyspotentialiaali on enintään -26 % vuonna 2040 verrattuna perusennusteeseen (Kuva 6).

Perusennusteessa khk-päästöt vähenevät -26 % vuoteen 2040 mennessä verrattuna nykytilaan eli vuoden 2020 tasoon (2,46 milj. t CO<sub>2</sub>eqv). Biopolttoöljyn jakeluvaihteen korottaminen vauhdittaa khk-päästövähennyksiä siten, että BIO20-skenaariossa vähennys on -35 %, BIO30-skenaariossa -42 % ja BIO34-skenaariossa -45 % vuoteen 2040 mennessä verrattuna vuoden 2020 tasoon.

Verrattaessa työkoneiden khk-päästöjen vuoden 2005 tasoon (2,59 milj. t CO<sub>2</sub>eqv), päästövähennys BIO20-skenaariossa on -33 %, BIO30-skenaariossa -41 % ja BIO34-skenaariossa -44 %.

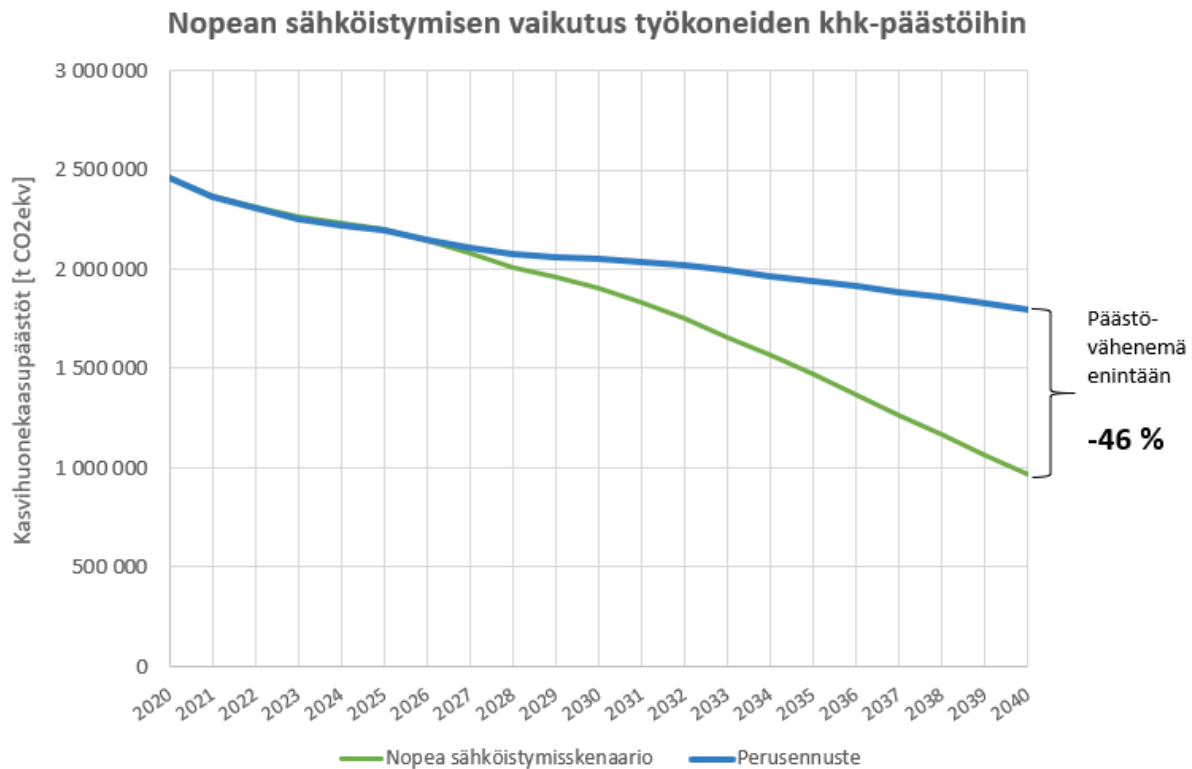
Taulukko 3. Khk-päästöt ja lisäpäästövähennykset jakeluvaihteen korotusskenaarioissa verrattuna perusennusteeseen.

| Skenaario | BIO20                  |                     | BIO30                  |                     | BIO34                  |                     |
|-----------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| Vuosi     | [tCO <sub>2</sub> eqv] | Lisäpäästö-vähennys | [tCO <sub>2</sub> eqv] | Lisäpäästö-vähennys | [tCO <sub>2</sub> eqv] | Lisäpäästö-vähennys |
| 2019      | 2 429 312              | 0 %                 | 2 429 312              | 0 %                 | 2 429 312              | 0 %                 |
| 2020      | 2 463 393              | 0 %                 | 2 463 393              | 0 %                 | 2 463 393              | 0 %                 |
| 2021      | 2 363 044              | 0 %                 | 2 363 044              | 0 %                 | 2 363 044              | 0 %                 |

|      |           |       |           |       |           |       |
|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| 2022 | 2 307 380 | 0 %   | 2 307 380 | 0 %   | 2 307 380 | 0 %   |
| 2023 | 2 252 563 | 0 %   | 2 252 563 | 0 %   | 2 252 563 | 0 %   |
| 2024 | 2 223 431 | 0 %   | 2 223 431 | 0 %   | 2 223 431 | 0 %   |
| 2025 | 2 195 741 | 0 %   | 2 195 741 | 0 %   | 2 195 741 | 0 %   |
| 2026 | 2 151 153 | 0 %   | 2 151 153 | 0 %   | 2 151 153 | 0 %   |
| 2027 | 2 110 129 | 0 %   | 2 110 129 | 0 %   | 2 110 129 | 0 %   |
| 2028 | 2 076 571 | 0 %   | 2 076 571 | 0 %   | 2 076 571 | 0 %   |
| 2029 | 2 063 611 | 0 %   | 1 997 578 | -3 %  | 1 953 556 | -5 %  |
| 2030 | 2 052 132 | 0 %   | 1 920 628 | -6 %  | 1 832 958 | -11 % |
| 2031 | 1 993 490 | -2 %  | 1 841 005 | -10 % | 1 775 654 | -13 % |
| 2032 | 1 930 809 | -4 %  | 1 779 649 | -12 % | 1 714 867 | -15 % |
| 2033 | 1 867 040 | -6 %  | 1 696 033 | -15 % | 1 653 281 | -17 % |
| 2034 | 1 798 286 | -9 %  | 1 608 586 | -18 % | 1 545 353 | -21 % |
| 2035 | 1 733 072 | -11 % | 1 524 948 | -21 % | 1 441 699 | -26 % |
| 2036 | 1 709 311 | -11 % | 1 503 925 | -21 % | 1 421 771 | -26 % |
| 2037 | 1 683 315 | -11 % | 1 480 961 | -21 % | 1 400 019 | -26 % |
| 2038 | 1 658 100 | -11 % | 1 458 691 | -21 % | 1 378 927 | -26 % |
| 2039 | 1 630 989 | -11 % | 1 434 763 | -21 % | 1 356 272 | -26 % |
| 2040 | 1 600 695 | -11 % | 1 408 059 | -21 % | 1 331 004 | -26 % |

### 3.3.2 Nopean sähköistymisen skenaario

Tilaajan pyynnöstä laadittiin nopean sähköistymisen skenaario, jossa sähköistyminen (teknologinen kehitys sekä markkinadiffuusio) tapahtuu nopeammin kuin perusennusteessa. Skenaariossa on arvioitu sähköistymisen potentiaalia työkoneryhmittäin huomioimalla työkoneiden sähkön käytön teknistä vaativuutta yhdistettynä latausmahdollisuuksiin, akun lisämäärän tuomaa haittaa työkoneen käytölle sekä sähkötyökoneen houkuttelevuutta investointikustannusten ja polttoainekustannusten näkökulmasta. Markkinadiffuusion muutosnopeus on arvioitu sen perusteella, kuinka vaativaa työkonetyypin sähköistäminen em. kriteerien perusteella.



Kuva 7. Nopean sähköistymisen khk-päästövähennyspotentiaali.

Khk-päästöt seuraavat perusennusteen uraa nopeassa sähköistymisskenaariossa vuoteen 2026 asti, jonka jälkeen sähköistymisen päästövähennyspotentiaali kasvaa nopeasti. Nopean sähköistymisen skenaariossa työkoneiden khk-päästöt laskevat siten, että vuonna 2030 päästöt ovat 1,90 milj. t CO<sub>2</sub>ekv, vuonna 2035 1,47 milj. t CO<sub>2</sub>ekv ja vuonna 2040 0,96 milj. t CO<sub>2</sub>ekv.

Lisäpäästövähennys verrattuna perusennusteeseen on vuoteen 2030 mennessä -7 %, vuoteen 2035 mennessä -24 % ja vuoteen 2040 mennessä -46 %. Verrattaessa työkoneiden khk-päästöjen vuoden 2005 tasoon (2,59 milj. t CO<sub>2</sub>ekv), päästövähennys nopean sähköistymisen skenaariossa on -43 %.

Nopean sähköistymisen päästövähennyspotentiaali on suuri verrattuna perusskenaarioon. Eroa selittää oletus sähköisten työkoneiden vauhdikkaammasta markkinadiffuusiosta, joka on perusennusteessa huomattavasti konservatiivisempi. Nopean sähköistymisen skenaario esittää sähköistymisen maksimipäästövähennyspotentiaalia nykytiedon valossa.

#### 4. Johtopäätökset ja yhteenveto

Työkoneiden päästöt ja niiden vähentäminen ovat nousseet kiinnostuksen kohteiksi Suomen ilmasto- ja energiapolitiikassa. Työkoneiden khk-päästöt ovat pysyneet likimain samalla tasolla viimeisen 30 vuoden ajan TYKO 2019 -mallin tulosten mukaan. Lähipäästöt ovat kuitenkin vähentyneet viimeisten 15 vuoden aikana Stage-päästösäätelyn vuoksi.

Valtaosa suuripäästöisimmistä työkoneista on dieselkäyttöisiä: maataloustraktorit, pyöräkuormaajat ja tela-alustaiset kaivukoneet tuottavat jo lähes puolet kaikista khk-päästöistä. Vaihtoehtoiset käyttövoimat kuten sähkö ja kaasu alkavat olla varteenotettavia vaihtoehtoja pienikokoisissa ja -tehoisissa työkoneissa, mutta suurikokoisten, latausinfra-



ulottumattomissa käytettävien työkoneneiden sähköistäminen on haastavaa niin akkujen energiasisällön riittävyyden kuin koneen tarvitseman tehon kannalta.

Akkusähköisten työkoneneiden markkinatarjonta monen suuripäästöisimmän työkoneluokan osalta on suppeaa tai sitä ei ole vielä lainkaan. Sähkötyökoneneiden hidas markkinadiffuusio 2020-luvulla ei vaikuta päästöihin perusennusteessa vielä merkittävästi. Vasta 2030-luvulla teknologisen kehityksen oletetaan olevan kypsempää vauhdittamaan markkinadiffuusiota. Sähköistymisellä on kuitenkin merkittävä päästövähennyspotentialiaali: nopeampi teknologinen kehitys ja markkinadiffuusio voivat vähentää päästöjä lähes puoleen vuoteen 2040 mennessä perusennusteeseen verrattuna.

Työkoneneiden laajamittainen sähköistyminen on vasta alkutekijöissään, mutta kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistarve ajaa osaltaan työkoneneiden sähköisten voimalinjojen kehitystä sekä siirtymistä biopolttoaineisiin. Pitkällä aikavälillä myös automaation uskotaan osaltaan vauhdittavan työkoneneiden sähköistymistä. Työkoneneiden lähipäästöjä sääntelevä Stage-luokitus on saanut päästöt onnistuneesti laskuun, mutta hiilidioksidi- ja muiden kasvihuonekaasupäästöjen sääntely puuttuu täysin. CO<sub>2</sub>-raja-arvo voisi vauhdittaa sähkötyökoneneiden teknologista kehitystä ja markkinadiffuusioita vähentäen painetta biopolttoaineiden käytön lisäämiseen khk-päästöjen vähentämiseksi.

## 5. Lähdeviitteet

---

Lajunen, A., Sainio, P., Laurila, L., Pippuri-Mäkeläinen, J., Tammi, K. (2018). Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery, *Energies*, vol. 11, no. 5, pp. 1–22.

Laurikko, J., Mäkelä, K. (2019). TYKO-mallin tiedonkeruujärjestelmän kehittäminen. Tutkimusraportti VTT-R-00432-19. *Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy*

Koponen, K., Sokka, L. (2019). REDII -direktiivi: Kasvihuonekaasupäästövähenemää koskevat kestävyyskriteerit: (päivitys raporttiin VTT-R-04453-17). Tutkimusraportti Nro VTT-R-00887-19. *Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy*.

Motiva (2020). Kestävät julkiset hankinnat. Työkoneet. Motivan verkkosivut (viitattu 17.3.2021). Saatavissa: [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kestavat\\_julkiset\\_hankinnat/tietopankki/tyokoneet](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/tyokoneet)

Nylund, N.O., Söderena, P., Rahkola, P. (2016). Työkoneiden CO<sub>2</sub> päästöt ja niihin vaikuttaminen. Tutkimusraportti VTT-R-04745-16. *Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy*

Moreda, G.P., Muñoz-García, M.A., Barreiro, P. (2016). High voltage electrification of tractor and agricultural machinery - A review. *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, no. x, pp. 117–131, 2016

Murtonen, T. (2004). Polttoaineen laadun vaikutus polttoaineen kulutukseen raskaassa dieselmoottorissa. VTT Processes. Project Report, no. PRO3/5115/04, *Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy*. Saatavilla: <https://cris.vtt.fi/en/publications/polttoaineen-laadun-vaikutus-polttoaineen-kulutukseen-raskaassa-d>

Orr, G. (2003). Diffusion of innovations, by Everett Rogers (1995). Retrieved January, 21, 2005.

Sipilä, E., Kiuru, H., Jokinen, J., Saarela, J., Tamminen, S., Laukkanen, M., Palonen, P., Nylund, N.O., Sipilä, K. (2018). Biopolttoaineiden kustannustehokkaat toteutuspolut vuoteen 2030. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta. *Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja* 63/2018. Lokakuu 2018.

St1. (2021). Velvoitteet ja standardit. Verkkosivusto (viitattu 18.3.2021). Saatavissa: <https://www.st1.fi/yrityksille/tuotteet-ja-palvelut/polttonesteklinikka/velvoitteet-ja-standardit>

TEM (2021). Työ ja elinkeinoministeriö (TEM). Biopolttoaineet ja bionesteet. Verkkosivusto. Viitattu 16.3.2021. Saatavissa: <https://tem.fi/biopolttoaineet>